

破損素子を有する2次元大規模周期的アレーアンテナの 局所アドミタンス補償による解析

今野 佳祐[†] 陳 強[†] 澤谷 邦男[†] 瀬在 俊浩^{††}

[†] 東北大学大学院 工学研究科 電気通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 宇宙航空研究開発機構, 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 宇宙太陽光利用システム (Space Solar Power Systems, SSPS) に用いられる電力伝送用大規模周期的アレーアンテナを解析できる手法として, 筆者らはこれまでにインピーダンス拡張法 (Impedance Extension Method, IEM) を提案してきた. IEM は, 周期的アレーアンテナ各素子の動作インピーダンスの性質に基づいた近似解析法であるため, 解析対象のアレーアンテナにも周期性があることを前提としている. しかしながら, SSPS 用大規模アレーアンテナの周期性は, 運用中に生じる給電回路の破損や断線などによって部分的に失われることがある. 本稿では, 素子の破損によって部分的に周期性が失われた2次元大規模アレーアンテナを解析できるように IEM を改良したので報告する. キーワード アレーアンテナ, モーメント法, インピーダンス拡張法.

Analysis of 2D Large-scale Periodic Array Antenna with Faulty Elements by Local Admittance Compensation

Keisuke KONNO[†], Qiang CHEN[†], Kunio SAWAYA[†], and Toshihiro SEZAI^{††}

[†] Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

^{††} Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba Aerospace Center 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki,
305-3505, Japan

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract The impedance extension method (IEM) has been proposed so far, as a method for analysis of a huge-scale periodic array antenna for power transmission from space solar power systems (SSPS) to the earth. Since the IEM is an approximate method based on active impedance properties of elements in the periodic array antenna, the IEM can only be applied to the periodic array antenna. However, periodicity of the array antenna can not be kept in the areas where antenna elements are broken due to the trouble in feeding circuits or feeding cables. In this paper, it is reported that the IEM is extended to be valid to a two-dimensional large-scale periodic array antenna with faulty elements.

Key words Array antenna, method of moments (MoM), impedance extension method.

1. ま え が き

近年, 化石燃料をはじめとするエネルギー資源の枯渇が非常に大きな問題となっている. この問題を解決する手法の1つとして, 宇宙太陽光利用システム (SSPS) が提案 [1] され, これまでに様々な研究が行われてきた [2]-[7]. また, SSPS によって生み出された電力をマイクロ波を用いて地上に送電するために, 超大規模周期的アレーアンテナが利用される. そこで, SSPS 用超大規模周期的アレーアンテナのビーム幅や動作利得パターン,

エッジ効果などの特性を解析する必要がある. しかしながら, SSPS 用超大規模周期的アレーアンテナの素子数は数億に達し, 既存の手法では解析が困難である.

筆者らはこれまでに, SSPS 用超大規模周期的アレーアンテナを解析する手法としてインピーダンス拡張法 (IEM) を提案してきた [8], [9]. IEM は, Hansen らによって明らかにされた周期的アレーアンテナ各素子の動作インピーダンスが有する性質に基づいた近似解析手法である [10]-[16]. IEM は, 既存の手法で解析可能である比較的小規模な周期的アレーアンテナ (Small

array) の解析結果を利用して超大規模アレーアンテナ (Huge array) の解析を行うので、解析に要する計算時間が解析対象のアレーアンテナの素子数に依存しない。筆者らは実際に、IEM によって 4 億素子を有する 2 次元周期的アレーアンテナの動作利得パターンを求めることに成功した [17].

IEM では、Small array と Huge array 中における各素子の動作インピーダンスが、端部にある素子同士、中央部にある素子同士それぞれでほとんど一致することを利用してはいる。しかしながら、SSPS 用大規模アレーアンテナにおいては運用中に生じる素子の破損によって、周囲にある素子の動作インピーダンスが変動してしまう。従って、破損素子及びその周辺においては、Small array と Huge array 中における各素子の動作インピーダンスの対応関係が成立せず、IEM を適用することができない。そこで、破損素子を有する大規模アレーアンテナの解析ができるように、IEM を改良する必要がある。

本稿ではまず、2 次元周期的アレーアンテナにおける IEM の原理を説明する。続いて、破損素子及びその周辺にある素子の動作インピーダンスが変動した影響を IEM において補償する方法である、局所アドミタンス補償 (Local Admittance Compensation, LAC) について説明する。その後、破損素子とその周辺にある素子の動作インピーダンスに与える影響を定量的に評価する。そして、破損素子を有する 2 次元大規模アレーアンテナの解析を行い、LAC の有効性を評価する。

2. インピーダンス拡張法

2.1 周期的アレーアンテナの動作インピーダンス

過去の論文 [10]- [16] によると、周期的アレーアンテナの動作インピーダンスには、以下のような性質があることが分かっている。

- (1) 動作インピーダンスは給電振幅分布にほとんど依存しない。
- (2) アレー中央部にある素子の動作インピーダンスは一樣で、エッジ部分にある素子の動作インピーダンスは変動する。
- (3) 素子数が十分大きいとき、動作インピーダンスは素子数にほとんど依存しない。

これらの性質を利用すると、比較的小規模な周期的アレーアンテナの動作インピーダンスを利用して、超大規模なアレーアンテナの動作インピーダンスを推定することができる。

2.2 インピーダンス拡張法

周期的アレーアンテナの動作インピーダンスの性質を用いた解析手法であるインピーダンス拡張法を図 1 に示す。インピーダンス拡張法では、まず小規模なアレーアンテナである Small array をモーメント法によって厳密に解析し、各素子の動作インピーダンスを求める。次に、Small array にある各素子の動作インピーダンスを、解析したい超大規模アレーアンテナの Huge array にある各素子の動作インピーダンスに拡張してゆく。そして、得られた動作インピーダンスと与えた給電分布を利用して各素子の電流分布及び動作利得パターンを得る。

3. 局所アドミタンス補償

IEM において、破損素子及びその周辺にある素子の電流分

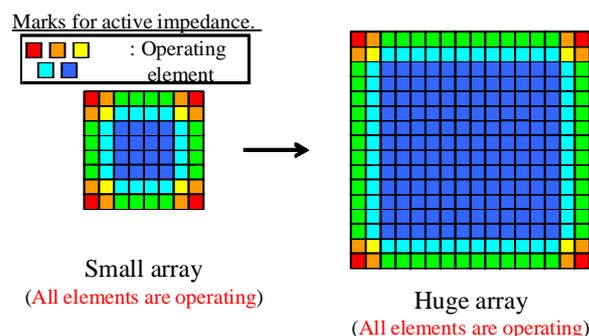


Figure 1 8 × 8 素子の Small array から 16 × 16 素子の Huge array へのインピーダンス拡張法。

布の変動を精度良く表現するために、局所アドミタンス補償 (Local Admittance Compensation, LAC) という手法を提案する。LAC は以下のような 5 つの手順に従って実行される。

- (1) 破損素子のない Small array 及び 1 素子だけ破損素子が存在する Small array の動作インピーダンスを全パターン計算する。
- (2) 破損素子のない Small array に対する、破損素子を 1 つだけ含む Small array の動作アドミタンスの差分を素子ごとに計算して保存。
- (3) 解析対象の Huge array 各素子に対して、破損素子のない Small array 各素子の動作インピーダンスを拡張する。
- (4) Huge array 中において破損素子が存在する箇所、及びその周辺の一定範囲にある素子の電流を、3 で拡張した動作インピーダンス、保存しておいた動作アドミタンスの差分及び素子の給電を用いて計算する。
- (5) 得られた電流分布を用いて、動作インピーダンスや動作利得パターンを計算する。

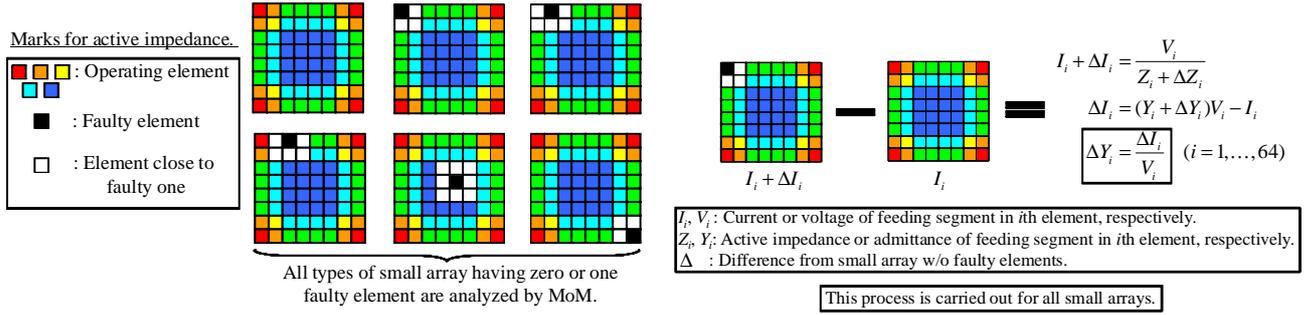
LAC は重ね合わせの原理に基づいているため、図 2(d) に示すように、破損素子の影響を大きく受ける素子が存在する領域である Local array が重なっている場合でも適用可能である。従って、ランダムな位置に破損素子を有する Huge array の解析を行うことが可能であるという利点を持っている。

4. 数値解析

4.1 解析モデル

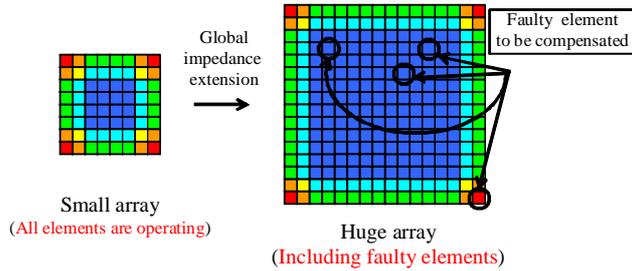
本稿の解析モデルである、SSPS 用反射板付き 2 次元クロスダイポールアレーアンテナの構造を図 3 に示す。反射板の上に、同じクロスダイポールアンテナ素子を平面状に周期配置した構造となっている。解析手法はモーメント法 (Method of Moments, MoM) を用い、反射板の大きさを無限大と仮定して鏡像法を用いた [18], [19]. また、Small array を解析するには共役勾配 (Conjugate Gradient, CG) 法を用いた [20].

破損素子の定義は、図 4 に示す。また、図 4(b) に示す Open は、宇宙ゴミの衝突や絶縁破壊などが原因で生じる断線を表現している。図 4(c) に示す Short は、給電電圧の低下や回路素子間の不整合を表現している。MoM で解析する際には、Open の素子は電源抵抗が $10^9 \Omega$ であるとし、Short の素子において電源抵抗を 0Ω 、給電電圧を $0V$ として計算を行った。

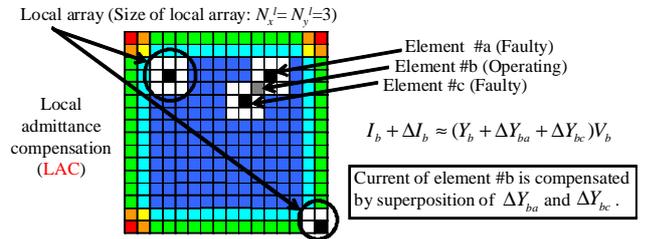


(a) 破損素子がない, または破損素子が 1 つだけの Small array を全パターン解析.

(b) 動作アドミタンス差分の保存.



(c) Huge array への動作インピーダンスの拡張.



(d) 動作アドミタンス差分を用いた局所電流補償.

Figure 2 8 × 8 の Small array から 16 × 16 の Huge array へのインピーダンス拡張と局所アドミタンス補償.

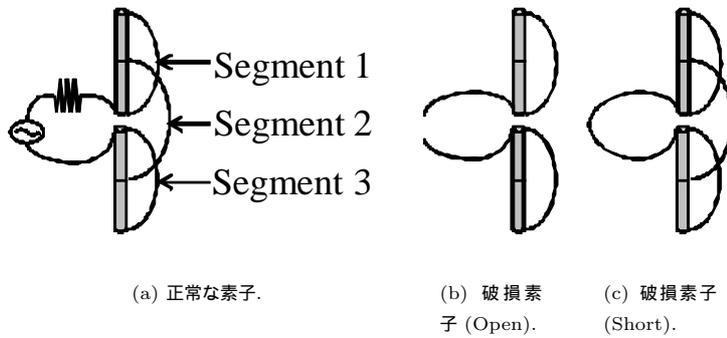


Figure 4 破損素子の定義.

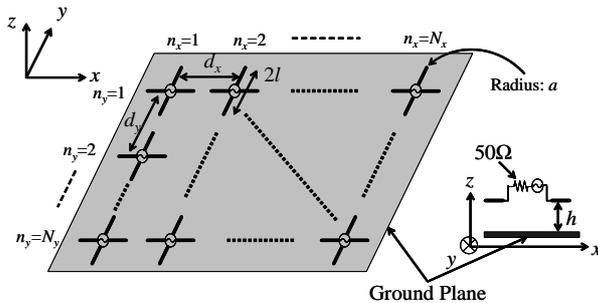


Figure 3 SSPS 用反射板付き 2 次元クロスダイポールアレーアンテナ.

4.2 破損素子が周囲にある素子に与える影響の評価

まず, Open 及び Short の状態になった素子が, 周囲にある素子の動作インピーダンスに与える影響を調査した. 解析諸元を以下の表 1 に示す. また, 動作インピーダンスの相対偏差評価式は, 以下ようになる.

$$\text{Relative deviation} = \frac{|Z_i^{\text{normal}} - Z_i^{\text{broken}}|}{|Z_i^{\text{normal}}|} = \frac{|\Delta Z_i|}{|Z_i^{\text{normal}}|} \quad (1)$$

ここで, Z_i^{normal} は破損素子含まない Small array における i 番目の素子の動作インピーダンス, Z_i^{broken} は破損素子があるときの i 番目の素子の動作インピーダンスで, ΔZ_i は Z_i^{normal} と Z_i^{broken} の差である. (1) 式を用いて, 破損素子とその周囲にあ

Table 1 解析諸元.

Length of array element $2l$	0.5λ
Radius of array element a	0.00825λ
Array spacing in x and y direction $d_x = d_y$	$0.55\lambda \sim 0.85\lambda$
Height of array element h	0.25λ
Segment division of array element K	3
Feeding amplitude distribution	10dB-taper
Size of small array $N_x^s = N_y^s$	50
Main beam direction $(\theta_{\text{main}}, \phi_{\text{main}})$	$(10^\circ, 0^\circ)$
Position of faulty element (n_x, n_y)	(25, 25)

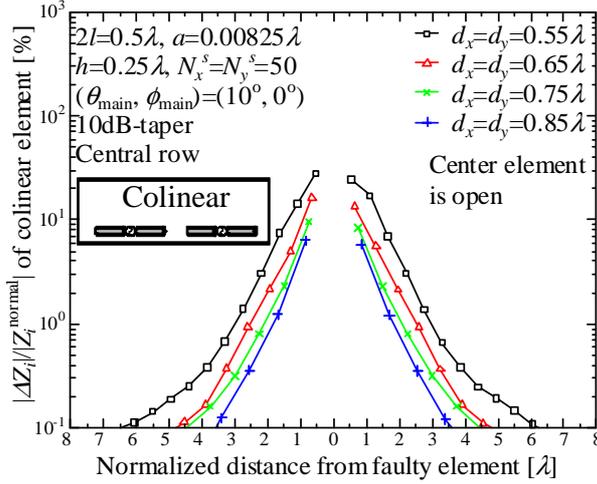


Figure 5 破損素子周辺にある素子の動作インピーダンスの相対誤差 (Colinear な位置関係にある素子, Open).

る素子の動作インピーダンスに及ぼす影響が局所的であることを示す。50 × 50 素子の Small array 中にある中央素子を Open, あるいは Short にしたときの周囲にある素子の動作インピーダンスの相対偏差を図 5, 6 にそれぞれ示す。これらの図から、破損素子とその周囲にある素子の動作インピーダンスに及ぼす影響は、破損の種類が Open, Short どちらの場合も、破損素子からの距離が大きくなるに従って減少することが分かる。また、破損素子の位置から 1 波長程度離れた位置にある素子の動作インピーダンスは数%から数十%程度変動し、3 波長程度離れると 0.1%から 1%程度の変動になることも分かる。

5. ランダムな位置に破損素子を有する大規模アレーアンテナの解析

最後に、IEM と LAC を組み合わせて、ランダムな位置に破損素子を有する大規模アレーアンテナの解析を行った。解析諸元は以下の表 2 に示す。乱数を用いて素子を破損させる際、Open の素子と Short の素子の割合がほぼ等しくなるようにした。

まず、10%程度の破損素子を含んだ 200 × 200 素子の Huge array を IEM/LAC によって解析した際の、各素子の動作インピーダンス絶対値の一例を図 7 に示す。図 7 から、従来の IEM を用いて解析した場合は、素子の破損を完全に無視しているため、破損素子及び周辺にある素子の動作インピーダンス絶対値がかなりずれていることが分かる。一方で、LAC を用いて破損素子及び周辺にある素子の電流を補償した場合は、各素子の動

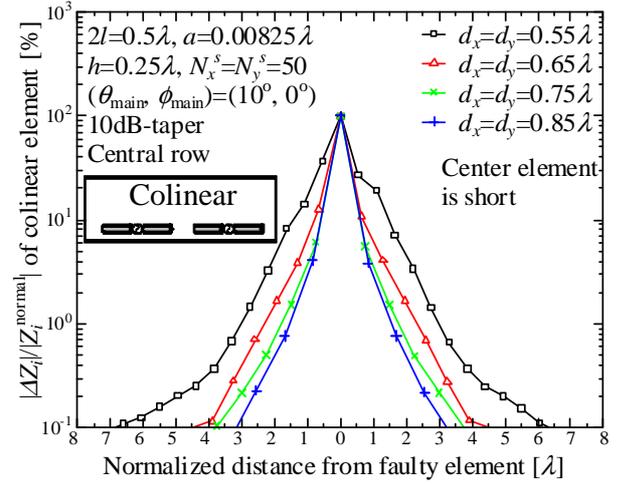


Figure 6 破損素子周辺にある素子の動作インピーダンスの相対誤差 (Colinear な位置関係にある素子, Short).

Table 2 解析諸元.

Length of array element $2l$	0.5λ
Radius of array element a	0.00825λ
Array spacing in x and y direction $d_x = d_y$	0.75λ
Height of array element h	0.25λ
Segment division of array element K	3
Feeding amplitude distribution	10dB-taper
Size of small array $N_x^s = N_y^s$	50
Size of huge array $N_x^h = N_y^h$	60, 80, 100, 140, 200
Size of local array $N_x^l = N_y^l$	1 (faulty element only), 3 ($1.5\lambda \times 1.5\lambda$), 9 ($6\lambda \times 6\lambda$)
Main beam direction $(\theta_{\text{main}}, \phi_{\text{main}})$	$(10^\circ, 0^\circ)$
Expression of faulty element	Composite of Open and Short (Open:Short=1:1)
Position of faulty element	Randomly selected
Number of trials M_{trial}	100
Average ratio of faulty element in Huge array	10%

作インピーダンス絶対値が厳密解とよく一致していることが分かる。また、本報告には示していないが、IEM/LAC を用いると動作インピーダンスの位相も厳密解とよく一致することが分かっている。

次に、動作利得パターンの一列を図 8 に示す。従来の IEM によって得られた動作利得パターンは、メインローブ付近では比較的良く一致しているように見えるが、サイドローブの部分では厳密解とのずれが顕著である。一方で、IEM/LAC によって得られた動作利得パターンは、メインローブ付近だけでなく、サイドローブの値も厳密解と比較的良好一致している。従って、破損素子を含むアレーアンテナを近似的に解析する際には、素子の破損による動作インピーダンスの変動を考慮する必要があると言える。

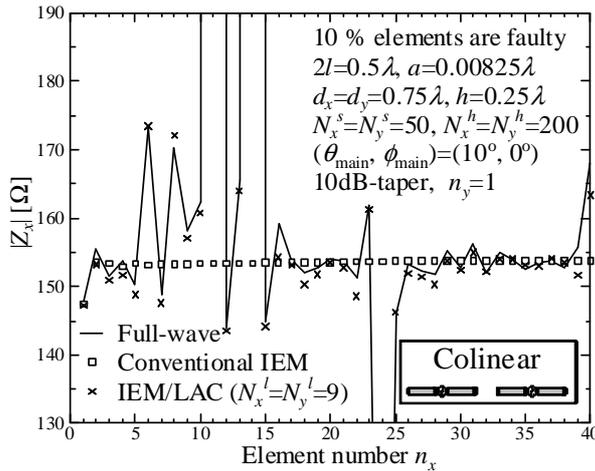


Figure 7 動作インピーダンス絶対値の一例 (Colinear な位置関係にある素子).

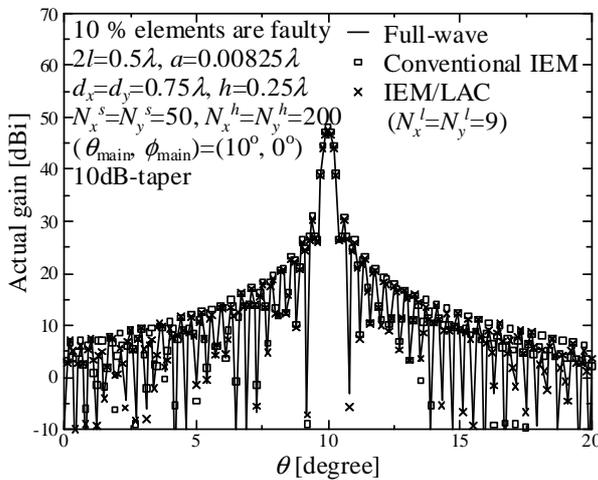


Figure 8 動作利得パターンの一例.

続いて、動作利得パターンのメインローブ及び第一サイドローブの振幅及び方向の誤差を求めた。誤差評価式は以下のようになる。

Mean relative error of amplitude

$$= \frac{1}{M_{\text{trial}}} \sum_{m=1}^{M_{\text{trial}}} \frac{||E_m^{\text{exact}}| - |E_m^{\text{approx}}||}{|E_m^{\text{exact}}|} \quad (2)$$

Mean absolute error of direction

$$= \frac{1}{M_{\text{trial}}} \sum_{m=1}^{M_{\text{trial}}} |\theta_m^{\text{exact}} - \theta_m^{\text{approx}}| \quad (3)$$

(2), (3) 式に示したように、振幅に関しては平均相対誤差、方向に関しては平均絶対誤差で評価した。ここで、 M_{trial} は試行回数で、表 2 に示したように今回は 100 回とした。また、 $|E_m^{\text{exact}}|$ は厳密に得られたメインローブあるいは第一サイドローブの振幅であり、 $|E_m^{\text{approx}}|$ は IEM あるいは IEM/LAC によって近似的に得られたメインローブあるいは第一サイドローブの振幅である。 θ_m^{exact} は厳密に得られたメインローブあるいは第一サイ

ドローブの方向であり、 θ_m^{approx} は IEM あるいは IEM/LAC によって近似的に得られたメインローブあるいは第一サイドローブの方向である。

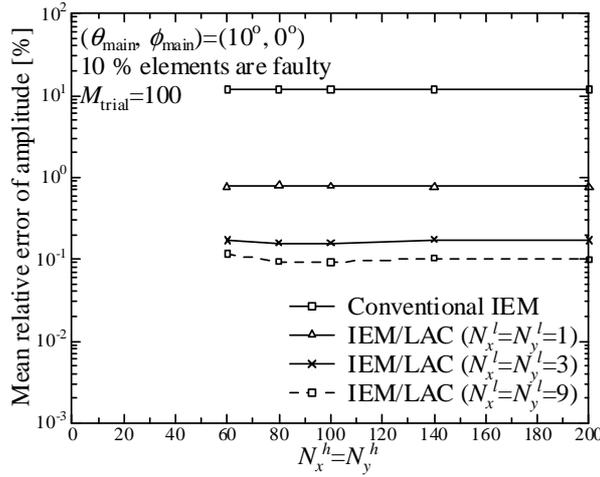
得られた結果を図 9 に示す。メインローブ及び第一サイドローブの振幅に関しては、従来の IEM で得られた値は破損素子を無視しており、その結果 11% 程度の誤差が生じた。一方で、IEM/LAC を用いると誤差を 0.1% 程度まで減少させることができた。また、メインローブ及び第一サイドローブの方向に関しても、IEM/LAC を用いることにより、従来の IEM と比較して誤差を減少させることができた。それから、Local array の大きさを $3 \times 3 (= 1.5\lambda \times 1.5\lambda)$ 以上に大きくしても、誤差は必ずしも減少しなかった。これは、破損素子が周囲にある素子の電流分布に与える影響は、破損素子からの距離が大きくなるに従って減少するからである。従って、破損素子の周囲 $1.5\lambda \times 1.5\lambda$ 程度の範囲に存在する素子に対して LAC を適用すれば十分であると言える。

6. むすび

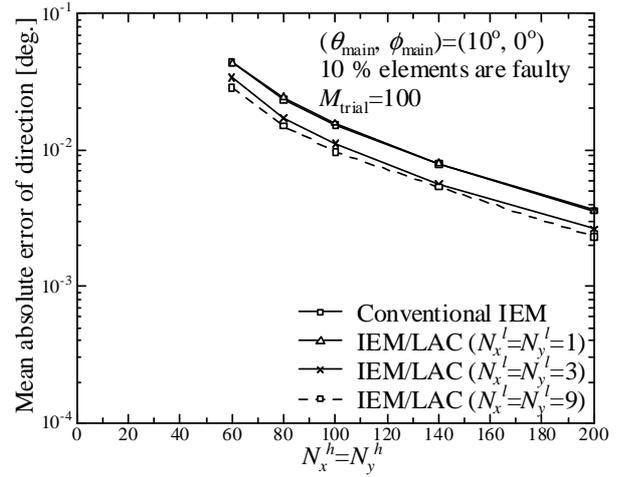
本稿では、ランダムな位置に破損した素子を有する大規模アレーアンテナの特性を解析するための手法である IEM/LAC を提案した。そして、提案手法を用いて 200×200 素子の大規模アレーアンテナを解析し、動作インピーダンス及び動作利得パターンが厳密解と良く一致することを確認した。加えて、動作利得パターンのメインローブ及び第一サイドローブの振幅及び方向の誤差を評価し、IEM/LAC の有効性を確かめた。LAC を適用する Local array の範囲は $1.5\lambda \times 1.5\lambda$ 程度で十分であると考えられる。今後は、数億素子規模の大規模アレーアンテナにおいて、破損素子の割合に対する動作利得パターンの変化を統計的に評価することなどが課題である。

References

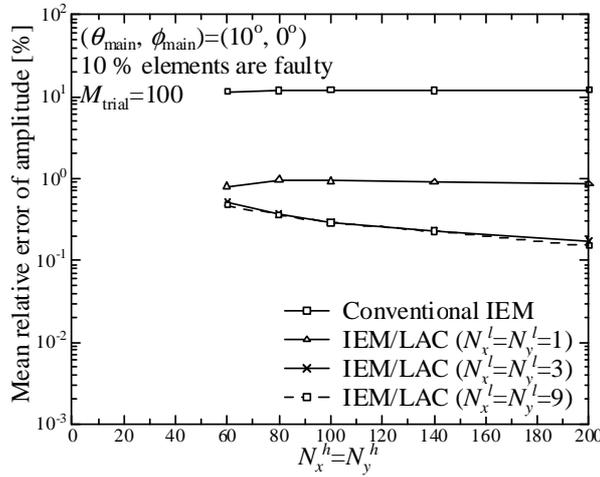
- [1] P.E. Glaser, "Power from the sun: Its future," Science, vol.162, pp.857-861, Nov. 1968.
- [2] P.E. Glaser, "An overview of the solar power satellite option," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.40, no.6, pp.1230-1238, June 1992.
- [3] K. Sudo, T. Hirano, J. Hirokawa, and M. Ando, "A radial line slot antenna fed by a rectangular waveguide through a crossed slot," IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.10, pp.3063-3070, Oct. 2003.
- [4] N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, "Solar power station/satellite (SPS) with phase controlled magnetrons," IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.8, pp.1550-1555, Aug. 2003.
- [5] T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, "Improvement of spurious noises generated from magnetrons driven by DC power supply after turning off filament current," IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.8, pp.1556-1563, Aug. 2003.
- [6] A.K.M. Baki, N. Shinohara, H. Matsumoto, K. Hashimoto, and T. Mitani, "Study of isosceles trapezoidal edge tapered phased array antenna for solar power station/satellite," IEICE Trans. Commun., vol.E90-B, no.4, pp.968-977, April 2007.
- [7] N. Shinohara, B. Shishkov, H. Matsumoto, K. Hashimoto, and A.K.M. Baki, "New stochastic algorithm for optimization of both side lobes and grating lobes in large antenna arrays for MPT," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.1, pp.286-296, Jan. 2008.



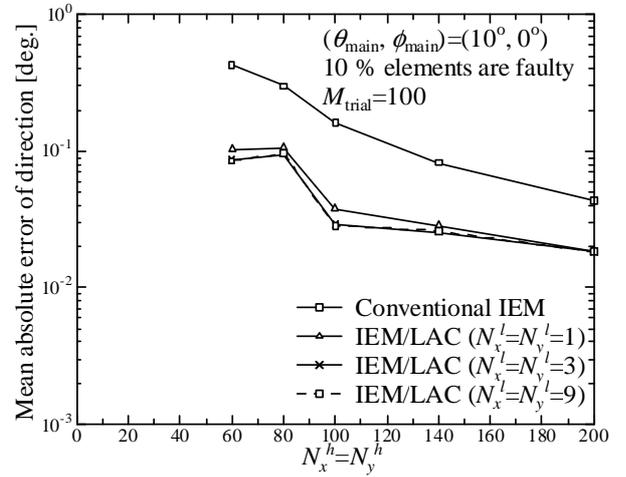
(a) メインローブの振幅の平均相対誤差.



(b) メインローブの方向の平均絶対誤差.



(c) 第一サイドローブの振幅の平均相対誤差.



(d) 第一サイドローブの方向の平均絶対誤差.

Figure 9 ランダムな位置に平均で10%の破損素子を含む Huge array のメインローブ及び第一サイドローブの誤差評価.

- [8] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna for SSPS using impedance extension method," Proc. IEICE Int. Symp. Electromagn. Compat., pp.33-36, July 2009, Kyoto, Japan.
- [9] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna using impedance extension method," IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.12, pp.3869-3874, Dec. 2009.
- [10] A. Ishimaru, R.J. Coe, G.E. Miller, and W.P. Geren, "Finite periodic structure approach to large scanning array problems," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-33, no.11, pp.1213-1220, Nov. 1985.
- [11] R.C. Hansen, and D. Gammon, "Standing waves in scan impedance of finite scanned arrays," Microw. Opt. Technol. Lett., vol.8, no.4, pp.175-179, March 1995.
- [12] R.C. Hansen, and D. Gammon, "Standing waves in scan impedance: E-plane finite array," Microw. Opt. Technol. Lett., vol.11, no.1, pp.26-32, Jan. 1996.
- [13] R.C. Hansen, and D. Gammon, "A gibbsian model for finite scanned arrays," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.44, no.2, pp.243-248, Feb. 1996.
- [14] R.C. Hansen, "Finite array scan impedance gibbsian models," Radio Science, vol.31, no.6, pp.1631-1637, Nov.-Dec. 1996.
- [15] R.C. Hansen, "Anomalous edge effects in finite arrays," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.47, no.3, pp.549-554, March 1999.
- [16] R.C. Hansen, Phased Array Antennas, Sect. 8.3, John Wiley & Sons, 1998.
- [17] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna for SSPS using impedance extension method," IEICE Tech. Rep., AP2009-51, pp.81-85, July 2009.
- [18] R.F. Harrington, Field Computation by Moment Methods, Macmillan, New York, 1968.
- [19] J.H. Richmond and N.H. Greay, "Mutual impedance of nonplanar-skew sinusoidal dipoles," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.23, no.5, pp.412-414, May 1975.
- [20] W.C. Gibson, The Method of Moments in Electromagnetics, Chapman & Hall/CRC, Florida, 2008.